



(10) BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND  
  
DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

(12) **Offenlegungsschrift**  
(10) **DE 100 19 697 A 1**

(5) Int. Cl.<sup>7</sup>:  
**H 01 L 43/00**  
H 01 L 27/22  
G 11 C 11/16  
G 01 R 33/12

(21) Aktenzeichen: 100 19 697.7  
(22) Anmeldetag: 20. 4. 2000  
(23) Offenlegungstag: 15. 11. 2001

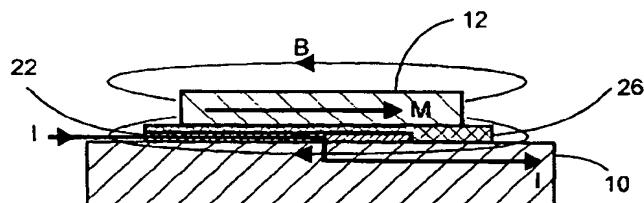
**DE 100 19 697 A 1**

(11) Anmelder:	US 59 62 905 US 58 77 511 US 56 54 566 WO 98 24 163 A2 WO 97 41 606 A1
(12) Erfinder:	MOODERA,Jagadeesh S.,MATHON,George: Spin polarized tunneling in ferromagnetic junctions. In: Journal of Magnetism and Magnetic Materials 200, 1999, S.248-273;
(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht zu ziehende Druckschriften:	JOHNSON,Mark: Bipolar Spin Switch. In: Science, Vol. 260, 16. April 1993, S.320-323; JP Patent Abstracts of Japan: 09214016 A; 10284765 A;

DE 197 46 138 A1  
DE 100 36 356 A1  
DE 44 25 331 A1  
DE 43 26 999 A1  
US 59 62 905 A  
US 54 32 373 A  
US 54 16 353 A  
US 61 04 275  
US 60 66 867  
US 59 73 334

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

- (54) Verfahren zur Erzeugung und Charakterisierung von spinpolarisierten Ladungsträgersystemen und darauf beruhende Bauelemente
- (55) Verfahren zur Erzeugung und Charakterisierung von spinpolarisierten Ladungsträgersystemen in Festkörpern (10) durch ein inhomogenes Magnetfeld, das durch ein magnetisches Material (12) oder durch einen stromdurchflossenen Leiter erzeugt wird und auf diesem Verfahren beruhende Bauelemente. Das Verfahren erlaubt insbesondere, die elektrischen Kontakte an die Ladungsträgersysteme und die Erzeugung und Charakterisierung der Spinpolarisation räumlich oder elektrisch zu trennen. Auf diesem Verfahren beruhende Bauelemente können als Spinntransistor, als Magnetfeldsensor, zur magnetischen Datenspeicherung und zur Realisierung von Schaltkreisen, die auf der Basis von Quantenlogik operieren, verwendet werden.



**DE 100 19 697 A 1**

## Beschreibung

[0001] Die Funktion der meisten elektronischen Bauelemente beruht auf Elektronen bzw. Löchern als Ladungsträgern. Diese besitzen einen quantenmechanischen Eigendrehimpuls (Spin) von  $\hbar/2$ . Der entsprechende quantenmechanische Operator hat zwei Eigenwerte,  $m_s = +1/2$  und  $m_s = -1/2$ , die zugehörigen Eigenzustände werden gewöhnlich als "spin up" und "spin down" bezeichnet. Elektronische Transportprozesse hängen i. A. von dem Spinzustand des Ladungsträgers ab. Beispiele sind die spinabhängige Streuung von Ladungsträgern untereinander oder zwischen Ladungsträgern und Störstellen. In den meisten Materialien – ausgenommen z. B. ferromagnetische und semimagnetische Stoffe – treten diese Spinzustände bei Zimmertemperatur jedoch nahezu gleich häufig auf. Es ergibt sich im Mittel also kein Überschuß von Ladungsträgern einer bestimmten Spinorientierung; die Spinpolarisation der Ladungsträger verschwindet im Mittel. Effekte, die auf der Spinpolarisation beruhen, können in elektronischen Bauelementen aus solchen Materialien nicht ausgenutzt werden. Dies gilt insbesondere für konventionelle Halbleiter wie Si oder GaAs, die die Grundlage der Mikroelektronik bilden. Vorrichtungen, die Ladungsträger mit einer bevorzugten Spinorientierung verwenden, bieten jedoch neue Möglichkeiten und Vorteile. Genannt seien hier Magnetfeldsensoren (D. J. Monsma, J. C. Lodder, Th. J. A. Popma and B. Dieny, Phys. Rev. Lett. 74, 5260 (1995)), die z. B. in der Magnetspeichertechnik, insbesondere in Schreib-Lese-Köpfen von Festplatten, bereits breite Anwendung finden, weiterhin die nichtflüchtige Speicherung von Daten in integrierten Schaltkreisen (magnetic random access memory, MRAM) oder Schaltkreise, die auf der Basis von Quantenlogik operieren (C. H. Bennett and D. P. DiVincenzo, Nature 404, 247 (2000)). Ein Ensemble von Ladungsträgern soll dabei als spinpolarisiert gelten, wenn in demselben ein Spinzustand häufiger auftritt als der andere, und nicht erst dann, wenn ausschließlich eine Spinspezies vorhanden ist.

[0002] Es ist wohl bekannt, daß sich durch Beleuchtung mit zirkular polarisiertem Licht geeignet gewählter Photonenenergie in einem Halbleiter spinpolarisierte Ladungsträger erzeugen lassen (D. Hägele, D. Oestreich, W. W. Rühle, N. Nestle und K. Eberl, Appl. Phys. Lett. 73, 1580 (1998)). Durch das Anlegen von geeigneten Potentialdifferenzen an einen so beleuchteten Halbleiter lassen sich spinpolarisierte Ströme in ihm einprägen. Um aber z. B. die Vorteile einer hohen Integrationsdichte ausnutzen zu können, ist statt der optischen Anregung eine rein elektrische Erzeugung von spinpolarisierten Ladungsträgern wünschenswert.

[0003] Eine Möglichkeit hierzu bieten spinabhängige Streu- oder Tunnelprozesse an sehr dünnen magnetischen Schichten. Ein bekanntes Beispiel ist der sog. riesige Magnetowiderstand (giant magnetoresistance, GMR) zwischen zumindest zwei ferromagnetischen Schichten, die durch eine nicht-ferromagnetische Schicht getrennt sind (M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich and J. Chazelas, Phys. Rev. Lett. 61, 2472 (1988)). Allerdings findet beim riesigen Magnetowiderstand und ähnlichen Effekten der Ladungstransport meist weit entfernt vom thermischen Gleichgewicht statt (sog. "heile" Ladungsträger), was nicht mit allen Anwendungen verträglich ist. Auch sind im allgemeinen sehr dünne Vielfachschichten aus speziellen Materialien voneinander, was die Integration beispielsweise in modernen mikroelektronischen Bauelementen erschwert.

[0004] Eine andere bekannte Möglichkeit zur Erzeugung von spinpolarisierten Ladungsträgern ist die Injektion von Ladungsträgern aus einer ferromagnetischen Kontaktsschicht

(M. Johnson, US-Patent 5,432,373), da in Kontaktsschichten aus solchen Materialien die elektronische Zustandsdichte an der Fermikante für die zwei Spinzustände unterschiedlich ist. Bei der Strominjektion aus der Kontaktsschicht in den an-

- 5 grenzenden Festkörper, z. B. einen Halbleiter, treten dann bevorzugt Ladungsträger einer Spinorientierung in letzteren über; der eingeprägte Strom wird von spinpolarisierten Ladungsträgern getragen. Bringt man ferromagnetische Kontaktsschichten auf Halbleiter auf, so ergeben sich jedoch an der Grenzfläche zwischen ihnen durch Interdiffusion oder Legierungsbildung meist sog. magnetisch tote Lagen, die die spinpolarisierte Injektion stark beeinträchtigen und bei einer Dicke von wenigen Monolagen die Spinpolarisierung vollständig zerstören. Es ist bekannt, daß sich diese Schwierigkeiten durch den Einsatz von dünnen Trennschichten (Tunnelbarrieren) umgehen lassen, allerdings führen solche Trennschichten meist zu hohen elektrischen Widerständen. Eine weitere Möglichkeit stellen Kontaktsschichten aus semimagnetischen Halbleitern, z. B. BeMnZnSe oder GaMnAs, dar (R. Fiederling, M. Keim, G. Reuscher, W. Ossau, G. Schmidt, A. Waag and L. W. Molenkamp, Nature 402, 787 (1999); Y. Ohno, D. K. Young, B. Beschoten, F. Matsukura, H. Ohno and D. D. Awschalom, ibid., 790 (1999)).

[0005] Allen oben aufgeführten Verfahren zur Einprägung eines Stroms von spinpolarisierten Ladungsträgern in einen Festkörper ist gemein, daß die Injektion von Ladungsträgern in den Festkörper und die Spinpolarisation der Ladungsträger durch ein und denselben Kontakt realisiert wird. Daher ist eine räumliche und elektrische Trennung von Kontakt und spinpolarisierender Vorrichtung unmöglich. Dies ist zum Beispiel hinsichtlich der Anwendung auf niedrigdimensionale Ladungsträgersysteme in Halbleitern von Nachteil, da zur guten elektrischen Kontaktierung derselben im allgemeinen spezielle Kontaktmaterialien nötig sind, die sich aber nicht zur Spinpolarisation eignen. Ein Verfahren, das es erlaubt, spinpolarisierte Elektronen- bzw. Löchergase (im folgenden zusammenfassend Ladungsträgersysteme genannt) in einem Festkörper unabhängig von den stromeinprägenden Kontakten zu erhalten, ist daher wünschenswert.

- 40 Es wird also ein neues Verfahren gesucht, das es erlaubt, ohne die Einwirkung von Photonen sowie unabhängig von den jeweiligen Eigenschaften der Kontaktsschichten zur Stromeinprägung und ggf. von denselben räumlich oder elektrisch getrennt eine Spinpolarisation der Ladungsträger in einem Festkörper zu erzielen. Darüber hinaus wäre es wünschenswert, ein Verfahren zu haben, das nicht durch die mit Tunnelbarrieren verbundenen Schwierigkeiten eingeschränkt ist. Schließlich wird ein Verfahren gesucht, das auch auf die Erzeugung einer Spinpolarisation in Halbleitern und insbesondere auf die Erzeugung von Spinpolarisation in dimensionsreduzierten Ladungsträgersystemen in Halbleitern, Halbleiterschichtstrukturen, oder Halbleiter-Isolator-Schichtstrukturen angewendet werden kann, z. B. in Quantenfilmen, Quantendrähten und in zwei- und eindimensionalen Elektronen- und Löchergasen.

[0006] Das erfundungsgemäß vertafte erfüllt diese Anforderungen, indem durch eine Vorrichtung, die von den stromeinprägenden Kontaktsschichten an den jeweiligen Festkörper unabhängig sein kann, in dem Festkörper ein inhomogenes Magnetfeld ausgebildet wird. Die Richtung des mittleren Magnetfeldes sowie des Magnetfeldgradienten soll dabei im Wesentlichen parallel bzw. antiparallel zur Transportrichtung der Ladungsträger (bzw. zur Stromrichtung) sein. Die Transportrichtung liege entlang der x-Richtung. Da die stromtragenden Ladungsträger aufgrund ihres Spins stets auch ein magnetisches Moment  $m$  aufweisen, erfahren sie im magnetischen Gradienten des inhomogenen Magnetfeldes  $B$  die Kraft  $F = \nabla(m \cdot B)$ . Die fett dargestell-

ten Größen sind dabei Vektoren, der Nabla-Operator

$$\nabla = \begin{pmatrix} \partial_x \\ \partial_y \\ \partial_z \end{pmatrix} \text{ und } \partial_x = \frac{\partial}{\partial x}, \quad \partial_y, \partial_z$$

entsprechend. Für Atomstrahlen bildet dieser Effekt die Grundlage des wohl bekannten Stern-Gerlach-Experiments (W. Gerlach und O. Stern, Z. Physik 9, 349 (1922)). Im Fall stationärer Felder gilt  $F = \nabla(m \cdot B) = (m \cdot \nabla)B$  (J. D. Jackson, Classical Electrodynamics, 2<sup>nd</sup> edition, Wiley (1995)). Einfachheitshalber werden wir im folgenden stets annehmen, daß nur eine kartesische Komponente des magnetischen Moments von 0 verschieden ist, in diesem Fall

$$\mathbf{m} = \begin{pmatrix} m_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Dann vereinfacht sich der Ausdruck für die Kraft zu  $F = (m \cdot \nabla)B = m_x \delta_x B$ . Die Komponente  $F_x = m_x \delta_x B_x$  dieser Kraft entlang der Stromrichtung bremst oder beschleunigt die Ladungsträger je nach der relativen Orientierung zwischen deren magnetischem Moment und dem magnetischen Feldgradienten und führt so zu Unterschieden im Strom von Ladungsträgern mit unterschiedlicher Spinorientierung. Der inhomogene Bereich des Magnetfeldes wirkt daher spinpolarisierend auf die Ladungsträger.

[0007] Eine bevorzugte Vorrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens besteht aus einem Festkörper, an dem zwei Kontaktkörper zur Stromeinprägung und mindestens eine das inhomogene Magnetfeld erzeugende Struktur vorgesehen sind. Dabei kann letztere eine ferromagnetische oder antiferromagnetische Schicht oder eine Schicht aus einem semimagnetischen Material sein, oder durch eine normal- oder supraleitende Leiterbahn, oder durch eine Gradientenspule gebildet werden.

[0008] Neben der Erzeugung ist auch die Charakterisierung der Spinpolarisation eines Ladungsträgersystems für viele Anwendungen relevant. Zur Detektion der Spinpolarisation von Ladungsträgern können alle oben angeführten Methoden eingesetzt werden. Bekannt ist die Möglichkeit, die Spinpolarisation der Ladungsträger in einem Halbleiter durch Messung der zirkular polarisierten Anteile des abgestrahlten Photolumineszenzlichts zu bestimmen. Sinngemäß gilt auch hier, daß die notwendige optische Spektroskopie die technische Relevanz dieser Nachweismethode drastisch beschränkt. Bekannt ist auch, daß spinabhängige Tunnel- oder Streuprozessen in sehr dünnen Schichtsystemen zur Detektion von spinpolarisierten Ladungsträgern in Festkörpern verwendet werden können. Schließlich ist bekannt, daß auch elektrische Kontakte aus magnetischen Materialien auf einem Halbleiter zur Charakterisierung der Spinpolarisation eines Ladungsträgersystems verwendet werden können. Hier können jedoch magnetisch tote Lagen wie im Falle der Erzeugung von spinpolarisierten Ladungsträgersystemen durch Injektion aus einem magnetischen Kontakt die Empfindlichkeit stark reduzieren. Ein zweiter Grund für die geringe Empfindlichkeit dieses Verfahrens ist die Tatsache, daß zwar im Ferromagneten an der Fermikante bevorzugt Zustände einer Spinorientierung besetzt sind, trotzdem die Zustandsdichte an der Fermikante für beide Spinzustände deutlich größer ist als diejenige im Halbleiter. Daher findet jeder Ladungsträger im Halbleiter einen freien Zustand in

Ferromagneten, die Spinselективität des Übergangs ist gering. Wie im Zusammenhang mit der Erzeugung von spinpolarisierten Ladungsträgersystemen bereits angesprochen, wird die Anwendbarkeit der genannten Meßverfahren z. B. auf niedrigdimensionale Systeme wegen der Untrennbarkeit von elektrischem Kontakt und Spindetektion stark eingeschränkt.

[0009] Erfindungsgemäß kann das eingangs genannte Verfahren ebenfalls dazu herangezogen werden, eine Spinpolarisation von Ladungsträgern zu detektieren. Dabei wird das Verfahren nicht auf ein unpolarisiertes Ladungsträgersystem angewandt, sondern auf einen bereits spinpolarisierten Strom. Analog zur Funktion des spinpolarisierenden Verfahrens erzeugt eine Vorrichtung ein inhomogenes Magnetfeld in einem Festkörper, in den von dieser Vorrichtung unabhängig ein Strom von spinpolarisierten Ladungsträgern eingeprägt ist, z. B. durch das erfindungsgemäß oben beschriebene spinpolarisierende Verfahren. Die magnetischen Momente der jeweiligen Ladungsträger erfahren wegen des durch das inhomogene Magnetfeld erzeugten magnetischen Gradienten wie oben beschrieben eine Kraft je nach ihrer relativen Orientierung zum Feldgradienten. Diese Kraft kann für den entsprechend der Spinpolarisation überwiegend anzu treffende Spinzustand entweder in die Richtung des elektrischen Transports oder dieser entgegengesetzt wirken, den Transport also entweder unterstützen oder behindern und somit zur Änderung des Stromes der Ladungsträger führen. Dies kann zum Nachweis der Spinpolarisation herangezogen werden.

[0010] Eine bevorzugte Vorrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens zur Charakterisierung der Spinpolarisation von Ladungsträgersystemen besteht aus einem Festkörper, an dem mindestens zwei Kontaktkörper zur Stromeinprägung, eine beliebige Vorrichtung zur Erzeugung einer Spinpolarisation der Ladungsträger und mindestens eine das inhomogene Magnetfeld erzeugende Struktur vorgesehen sind. Dabei kann die das inhomogene Magnetfeld erzeugende Struktur wieder eine ferromagnetische oder antiferromagnetische Schicht oder aus einem semimagnetischen Material sein. Die das inhomogene Magnetfeld erzeugende Struktur kann aber auch durch eine normal- oder supraleitende Leiterbahn oder durch eine Gradientenspule gebildet werden. Die Spinpolarisation kann dann durch Messung des Widerstandes des Festkörpers zwischen den beiden Kontaktten, durch Messung der über diesen Kontaktten abfallenden Spannung bei konstantem eingeprägtem Strom oder durch Messung des Stromes zwischen den Kontaktten bei konstanter angelegter Spannung bestimmt werden. Dazu kann es hilfreich sein, getrennte Kontakte zur Einprägung des Stromes und zur Messung der über dem Festkörper abfallenden Spannung zu verwenden (Vierpunktmetode zur Messung kleiner Widerstände).

[0011] Die erfindungsgemäßen Vorrichtungen zur Erzeugung von Spinpolarisierung und zur Charakterisierung der Spinpolarisierung von Ladungsträgern in Festkörpern können auch zu einer gemeinsamen Vorrichtung zusammengefaßt werden, die zwei Strukturen zur Erzeugung von inhomogenen Magnetfeldern auf einem Festkörper umfaßt.

[0012] Die Auswirkungen inhomogener Magnetfelder (Streufelder) auf den Ladungsträgertransport insbesondere in zweidimensionalen Ladungsträgersystemen sind ausführlich untersucht worden. Bei den zweidimensionalen Ladungsträgersystemen in der x-y-Ebene ausgedehnt und ein Strom durch äußere Kontakte so eingeprägt, daß er vornehmlich in x-Richtung fließe, so sind lokale Hall-Effekte, die auf Magnetfeldern in z-Richtung beruhen und zu Hall-Spannungen in y-Richtung führen, wohl bekannt (z. B. M. Johnson, B. R. Bennett, M. J. Yang, M. M. Miller und B. V. Shanabrook,

Appl. Phys. Lett. 71, 974 (1997)). Ebenso bekannt ist, daß Magnetfelder  $B$ , deren z-Komponente lokal variiert, zu sog. magnetischen Barrieren führen, die den Stromtransport in x-Richtung beeinflussen können (z. B. A. Matulis, F. M. Peters and P. Vasiopoulos, Phys. Rev. Lett. 72, 1518 (1994), V. Kubrak, F. Rahman, B. L. Gallagher, P. C. Main, M. Henini, C. H. Marrows and M. A. Howson, Appl. Phys. Lett. 74, 2507 (1999)). Allerdings wurde die Wirkung von Gradientenfeldern auf das magnetische Moment der Ladungsträger nicht berücksichtigt. Eine Ausnahme bildet der von Schmidt beschriebene Ansatz (G. Schmidt, Patent DE 197 46 138 A1), dem die Ablenkung eines Ladungsträgers, der sich in x-Richtung bewegt und ein magnetisches Moment

$$\mathbf{m} = \begin{pmatrix} 0 \\ m_y \\ 0 \end{pmatrix}$$

hat, in einem inhomogenen Magnetfeld, genauer in dem entsprechenden Gradientenfeld  $\delta_y B$ , zugrunde liegt. Die Ablenkung erfolgt dabei in y-Richtung, d. h. quer zur mittleren Flug- bzw. Transportrichtung (der x-Richtung). Im Fall geladener Teilchen baut sich durch die Ablenkung eine Ladungsasymmetrie und damit ein elektrisches Potential ebenfalls quer zur mittleren Bewegungsrichtung der Teilchen auf. Dieses Potential wird nach Schmidt zur Detektion der Spinpolarisation herangezogen. Relevant ist also die Gradientenkraft  $F = m_y \delta_y B$  bzw. die Kraftkomponente in y-Richtung  $F_y = m_y \delta_y B_y$  (d. h.  $B_y \neq 0!$ ). Dies ist vom Halleffekt zu unterscheiden, bei dem sich bei elektrischem Transport in x-Richtung in einem Magnetfeld mit einer nichtver schwindenden z-Komponente ( $B_z \neq 0$ ) ebenfalls ein Potential in y-Richtung ergibt, allerdings wegen der Lorentzkraft  $F = qv \times B$  bzw. deren Kraftkomponente  $F_y = -qv_x B_z$  ( $q$  sei die Ladung,  $v$  sei die Geschwindigkeit der Ladungsträger). [0013] Die Erfindung schlägt damit ein Verfahren vor, das sich sowohl zur Erzeugung als auch zum Nachweis der Spinpolarisation eines Ladungsträgersystems in einem Festkörper eignet. Das Verfahren zur Erzeugung einer Polarisierung unterscheidet sich grundsätzlich von bereits existierenden Verfahren, da es insbesondere die elektrische und ggf. räumliche Trennung der zur Stromeinprägung dienenden Kontakte und der zur Spinpolarisation notwendigen Struktur ermöglicht. Dadurch können auch niedrigdimensionale Ladungsträgersysteme spinpolarisiert werden, ohne daß bereits entwickelte, wohl etablierte Kontaktierungsmethoden an diese modifiziert werden müssen. Die Möglichkeit, im Fall der Verwendung von normal- oder supraleitenden Leitern zur Erzeugung des inhomogenen Magnetfelds die Stärke desselben und damit den Grad der Spinpolarisation einfach und gut kontrollierbar variieren zu können, bedeutet einen weiteren Vorteil. Das gilt entsprechend für das Verfahren zur Detektion einer Spinpolarisation. Das erfindungsgemäße Verfahren zur Detektion unterscheidet sich von dem von Schmidt beschriebenen Verfahren grundlegend durch die Anordnung des Gradienten des inhomogenen Magnetfelds relativ zur elektrischen Transportrichtung (der x-Richtung). Das von Schmidt beschriebene Verfahren verwendet Gradienten quer zur Transportrichtung, d. h. entlang der y-Richtung (transversal). Erfindungsgemäß beruht das hier vorgeschlagene Verfahren auf einem Gradienten entlang der Ladungsträger-Transportrichtung, d. h. entlang der x-Richtung. Diese longitudinale Anordnung des Gradienten und die entsprechend im Mittel entlang der elektrischen Transportrichtung wirkende Kraft auf die magnetischen Momente der je-

weiligen Ladungsträger bietet die Möglichkeit, niedrigdimensionale, insbesondere auch eindimensionale Ladungsträgersysteme zu polarisieren und zu analysieren. Die Ladungsasymmetrie und das entsprechende, zur Detektion der Polarisation herangezogene Potential quer zur Transportrichtung gemäß Schmidt kann in eindimensionalen Ladungsträgersystemen grundsätzlich nicht aufgebaut werden. Schließlich vereinfacht die erfindungsgemäße Möglichkeit, sowohl Spinpolarisator als auch Spinanalysator quasi identisch darzustellen, eine Verwendung des Verfahrens in integrierten elektronischen Schaltkreisen wesentlich.

[0014] Die einfachste Verwirklichung des Verfahrens ist in Abb. 1 dargestellt. Durch einen Festkörper (10), beispielsweise einen Halbleiter wie Silizium, fließt ein elektrischer Strom I (in x-Richtung). Über die gesamte stromtragende Breite des Festkörpers ist eine magnetische Schicht (12), bevorzugt z. B. aus einem Ferrormagneten wie Eisen, aufgebracht, deren Magnetisierung M im Wesentlichen parallel zur elektrischen Transportrichtung verläuft. Die magnetische Schicht (12) ist naturgemäß von einem Magnetfeld B umgeben – symbolisch dargestellt durch zwei Feldlinien – das auch in den Festkörper (10) eindringt. Vor allem an den quer zur Magnetisierungsrichtung verlaufenden Kanten der magnetischen Schicht (12) ist das diese Schicht umgebende Magnetfeld B stark inhomogen, d. h. in diesen Bereichen ist insbesondere der magnetische Feldgradient in x-Richtung,  $\delta_x B_x$ , besonders groß.  $\delta_x B_x$  ist dabei im Bereich des Festkörpers (10) unter der einen Kante negativ, unter der anderen positiv (Abb. 1). Ein Ladungsträger mit einem magnetischen Moment

$$\mathbf{m} = \begin{pmatrix} m_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

parallel zur x-Richtung, der sich entlang der elektrischen Transportrichtung unter der magnetischen Schicht (12) hindurch bewegt, erfährt also im Bereich der einen Kante eine seiner Bewegung entgegen gerichtete, unter der anderen Kante eine entlang seiner Bewegung gerichtete Kraftkomponente  $F_x = m_x \delta_x B_x$ . Der Transport des besagten Ladungsträgers wird also durch das im Festkörper (10) von der magnetischen Schicht (12) hervorgerufene inhomogene Magnetfeld beeinflußt, und zwar abhängig davon, ob das magnetische Moment des Ladungsträgers  $m$  und die Richtung des magnetischen Feldgradienten entlang der elektrischen Transportrichtung  $\delta_x B$  parallel oder antiparallel sind. Das ist in Abb. 2 nochmals dargestellt: die Orientierung der Magnetisierung M der magnetischen Schicht (12) auf dem Festkörper (10) ist nun antiparallel zur Stromrichtung I, dementsprechend sind die Bereiche mit positivem bzw. negativem magnetischen Feldgradienten  $\delta_x B_x$  im Vergleich zu Abb. 1 gerade vertauscht.

[0015] Für Ladungsträger mit Spin  $h/2$  ergeben sich bezüglich der x-Richtung als Quantisierungsrichtung zwei möglich Einstellungen des Spins (bzw. des magnetischen Moments), nämlich parallel bzw. antiparallel zur x-Richtung. Eine solche Quantisierungsrichtung kann z. B. durch ein von außen angelegtes homogenes Magnetfeld  $B_0$  (Abb. 1) im Bereich der besagten Vorrichtung erzwungen werden, aber bevorzugt einfach durch das mittlere Magnetfeld B der magnetischen Schicht (12) auf dem Festkörper (10) gegeben sein. Durch die so erzeugte quantisierte Einstellung des Spins der Ladungsträger wirkt aber ein Bereich im Festkörper (10) unter einer quer zur x-Richtung verlaufenden Kante der magnetischen Schicht mit einheitlichem Vorzeichen von

$\delta_x B_x$  spinselektiv auf Spin 1/2-Teilchen, da der Transport derselben je nach der Einstellung ihres Spins entweder behindert oder unterstützt wird. Um ein konkretes Beispiel zu geben, wird im folgenden die Auswirkung der in Abb. 1 dargestellten Vorrichtung auf einen Ladungsträger, dessen magnetisches Moment in die x-Richtung zeige, diskutiert. Unter der linken Kante der magnetischen Schicht (12) ist  $\delta_x B_x < 0$ . Daher erfährt der Ladungsträger eine verzögerte Kraft  $F_x = m_x \delta_x B_x < 0$ . Umgekehrt ist  $\delta_x B_x > 0$  an der rechten Kante, der Ladungsträger erfährt dort eine Beschleunigung. In diesem Zusammenhang ist Abb. 1 eher schematisch zum Verständnis der Funktion der erfindungsgemäßen Vorrichtung zu sehen, da für die beiden möglichen Einstellungen des Ladungsträgerspins jeweils ein Bereich mit Feldgradienten existiert, der den Transport behindert und unterstützt – es ergibt sich also kein Nettoeffekt. Die bevorzugte Realisierung der Vorrichtung ist beispielsweise den Abb. 8–11 zu entnehmen; es wird nur eine Kante der magnetischen Schicht (12) bzw. nur ein Bereich mit einheitlich orientiertem  $\delta_x B_x$  als spinselektives Element ausgenutzt.

[0016] Bevorzugte Materialien zur Darstellung der erfindungsgemäßen Vorrichtungen sind in Bezug auf den Festkörper (10) vor allem Halbleiter wie Silizium (Si), Germanium (Ge), Kohlenstoff (C) und deren Legierungen sowie deren Legierungen mit Übergangsmetallelementen (bevorzugt Mangan), seltenen Erden oder ferromagnetischen Elementen (bevorzugt Eisen), sog. III-V-Halbleitern wie z. B. Galliumarsenid (GaAs), Aluminiumarsenid (AlAs), Indiumarsenid (InAs), Indiumphosphid (InP) und deren Legierungen sowie deren Legierungen mit Übergangsmetallelementen (bevorzugt Mangan) (sog. Heusler-Legierungen), seltenen Erden oder ferromagnetischen Elementen (bevorzugt Eisen), Galliumantimonid (GaSb), Aluminiumantimonid (AlSb), Indiumantimonid (InSb) und deren Legierungen sowie deren Legierungen mit Übergangsmetallelementen (bevorzugt Mangan), seltenen Erden oder ferromagnetischen Elementen (bevorzugt Eisen), Galliumnitrid (GaN), Aluminiumnitrid (AlN), Indiumnitrid (InN) und deren Legierungen sowie deren Legierungen mit Übergangsmetallelementen (bevorzugt Mangan), seltenen Erden oder ferromagnetischen Elementen (bevorzugt Eisen), und sog. II-V-Halbleitern wie z. B. Zinkselenid (ZnSe), Zinksulfid (ZnS), Zinktellurid (ZnTe), deren Legierungen, deren Legierungen mit anderen Elementen der II. und VI. Hauptgruppe oder der II. Nebengruppe des Periodensystems der Elemente sowie deren Legierungen mit Übergangsmetallelementen (bevorzugt Mangan), seltenen Erden oder ferromagnetischen Elementen (bevorzugt Eisen). Die Herstellung dieser Halbleitermaterialien ist heute in der Halbleitertechnologie Stand der Technik. Niedrigdimensionale Ladungsträgersysteme können z. B. durch Heterostrukturen aus den vorgenannten Materialien erzeugt werden, insbesondere durch Quantentöpfe bzw. Quantenfilme z. B. im System GaAs/AlGaAs oder GaN/AlGaN, oder an Grenzflächen, z. B. von Silizium mit den Isolatoren Siliziumdioxid und Siliziumnitrid (Si/SiO<sub>2</sub> bzw. Si/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>). Mit derartigen Strukturen lassen sich auch zweidimensionale Ladungsträgersysteme realisieren, d. h. Systeme, in denen sich die Ladungsträger nur in zwei Raumrichtungen frei bewegen können. Die Realisierung von eindimensionalen Ladungsträgersystemen – in denen sich die Ladungsträger nur in einer Raumrichtung frei bewegen können – kann z. B. durch geeignete Strukturierung entsprechender Halbleiterproben mittels photolithographischer Techniken (optisch, oder mit Elektronen- oder Ionenstrahlen) und anschließendem naß- oder trockenchemischem Ätzen, oder durch reaktives Ionensätzen, oder durch Ionenimplantation, oder durch das Aufbringen zusätzlicher Gatekontakte, oder eine Kombination dieser und ähnlicher Tech-

niken erfolgen. Eine weitere Möglichkeit bietet das Überwachsen von Spaltflächen (cleaved edge overgrowth). Auch diese Methoden sind in der heutigen Halbleitertechnologie wohl etabliert.

- 5 [0017] Zur elektrischen Kontaktierung der Ladungsträgersysteme in besagtem Festkörper sollen bevorzugt die für das jeweilige Material üblichen Kontaktierungsmethoden und Kontaktmaterialien zur Herstellung der Kontakte verwendet werden, im Fall von niedrigdimensionalen Elektronensystemen im Halbleitersystem GaAs/AlGaAs beispielsweise Indium oder Mehrfachschichten aus Germanium, Gold und Nickel (ggf. auch einlegiert). Soll die erfindungsgemäße Vorrichtung als Detektor für spinpolarisierte Ladungsträgersysteme dienen, können auch semimagnetische Kontakte, beispielsweise die bereits erwähnten Materialien Be<sub>x</sub>Mn<sub>y</sub>Zn<sub>1-x-y</sub>Se oder Ga<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>As auf GaAs bzw. auf GaAs basierenden Heterostrukturen zur Erzeugung eines spinpolarisierten Ladungsträgersystems verwendet werden.
- 10 [0018] Die magnetische Schicht (12) (Abb. 1) soll bevorzugt aus einem ferromagnetischen Material bestehen, wie z. B. Eisen, Nickel, Cobalt, deren Oxiden und Legierungen, u. a. mit Aluminium, Silizium, oder seltenen Erden, sowie Ferriten. Auch ein antiferromagnetisches Material wie z. B. Chrom oder Nickelmonoxid kann verwendet werden, genauso wie Heterostrukturen aus ferronagnetischen und antiferromagnetischen Schichten, die es beispielsweise erlauben, die Magnetisierung in den Schichten zu pinnen. Geeignet sind auch semimagnetische Halbleiter, wie sie oben bereits exemplarisch angeführt sind.
- 15 [0019] Abb. 3 zeigt die erfindungsgemäße Vorrichtung aus Abb. 2, wobei zwischen den Festkörper (10) und die magnetische Schicht (12) eine weitere Schicht (14) eingebracht ist. Letztere kann beispielsweise aus einem Isolator, bevorzugt SiO<sub>2</sub> oder Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, bestehen, der den Festkörper (10) und die magnetische Schicht (12) elektrisch trennt.
- 20 [0020] In Abb. 4 ist eine mögliche Verwirklichung des Verfahrens, wie sie prinzipiell bereits in Abb. 2 im Schnitt dargestellt ist, nochmals gezeigt, und zwar für den Fall, daß der Festkörper (10) ein Halbleiter (bzw. eine Halbleiter-schichtstruktur oder eine Halbleiter-Isolator-Schichtstruktur) ist und der Stromtransport in denselben in einem zweidimensionalen Ladungsträgersystem (16) erfolgt, das nur zur graphischen Veranschaulichung aus dem Festkörper (10) herauszutreten scheint.
- 25 [0021] Abb. 5 zeigt das gleiche Prinzip, allerdings für ein eindimensionales Ladungsträgersystem (18).
- 30 [0022] In Abb. 6 ist die Vorrichtung aus Abb. 2 dargestellt, wobei nun eine Leiterbahn (20) anstelle der magnetischen Schicht ((12) in Abb. 2) die Struktur bildet, die das inhomogene Magnetfeld erzeugt. Die Leiterbahn (20) kann aus einem Normalleiter, z. B. Gold, Silber oder Aluminium, oder einem Supraleiter, bevorzugt einem Supraleiter zweiter Art, z. B. Niob-haltige Legierungen (NbTi, NbSn<sub>3</sub> etc.) oder Hochtemperatursupraleiter wie beispielsweise Yttriumbariumkupferoxid (YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>6-7</sub>), bestehen. Die Leiterbahn (20) durchfließt ein Strom I<sub>B</sub> im Mittel quer zur x-Achse, der nach dem Ampèreschen Gesetz von einem Magnetfeld B umgeben ist. Durch geeignete Wahl des Querschnitts der Leiterbahn (20) lassen sich stark inhomogene Magnetfelder an den quer zur x-Achse verlaufenden Kanten derselben erzielen, die die erfindungsgemäß benötigten Magnetfeldgradienten in x-Richtung erzeugen.
- 35 [0023] Abb. 7 zeigt im Vergleich zu Abb. 6, daß durch Umpolen der Richtung des Stromes I<sub>B</sub> die Gebiete mit positivem und negativem Magnetfeldgradienten vertauscht werden können. Durch geeignete Wahl der Stromrichtung I<sub>B</sub> kann also erfindungsgemäß das Vorzeichen des Magnetfeldgradienten im Bereich einer bestimmten, quer zur x-Achse

verlaufenden Kante der Leiterbahn (20) ausgewählt werden. [0024] Die magnetische Schicht (12) kann, entsprechend Abb. 8, auch als elektrischer Kontakt an den Festkörper (10) dienen, wenn sie aus entsprechenden Materialien, bevorzugt z. B. Eisen, besteht. Das hat den Vorteil, daß die Ladungsträger des Stromes I nach dem Übergang in den Festkörper (10) entlang des skizzierten Strompfades im Wesentlichen nur Bereiche mit einem einheitlichen Vorzeichen des magnetischen Feldgradienten durchlaufen, im Gegensatz zu der in Abb. 2 dargestellten Vorrichtung. Damit erfahren die Ladungsträger entsprechend ihrer jeweiligen Spineinstellung eine Kraft entgegen bzw. entlang der elektrischen Transportrichtung, d. h. eine Spinspezies wird bevorzugt den Bereich unter der magnetischen Schicht verlassen, das Ladungsträgersystem wird spinpolarisiert.

[0025] Abb. 9 zeigt eine Verwirklichung der Erfindung entsprechend Abb. 8, wobei der elektrische Kontakt an den Festkörper (10) durch eine zusätzliche, dedizierte Kontaktsschicht (22), vorzugsweise aus einem Metall oder einer Folge von Metallschichten, realisiert ist. Wie oben beschrieben ist das vorteilhaft, da so der elektrische Kontakt an das Ladungsträgersystem durch z. B. richtige Wahl des Kontaktmaterials separat von den Eigenschaften der magnetischen Kontaktsschicht (12) optimal hergestellt werden kann. In der Abbildung ist zudem noch eine Isolatorschicht (24) gezeigt, bevorzugt wieder z. B. aus  $\text{SiO}_2$  oder  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , die einen Übergang der Ladungsträger aus dem Kontakt (22) in den Festkörper (10) (bzw. das niedrigdimensionale Ladungsträgersystem im Festkörper) in einem Bereich mit Meinem Magnetfeldgradienten  $d_x B_x$  erzwingt. Anschließend erfolgt der Transport im Festkörper (10) durch den Bereich mit großem  $\delta_x B_x$  unterhalb einer Kante der magnetischen Schicht (12), der erfundungsgemäß die Spinpolarisation bewirkt. Im Bereich des Kontaktes (22) haben die Ladungsträger bereits einen Magnetfeldgradienten mit entgegengesetztem Vorzeichen durchlaufen. Wie in Zusammenhang mit Abb. 1 diskutiert, entsteht hier erfundungsgemäß eine Spinpolarisation. Da die Streuung in dem metallischen Kontakt (22) jedoch sehr hoch ist und deshalb die Spinpolarisation nicht über lange Wegstrecken erhalten bleibt, sind die Ladungsträger beim Übergang in den Festkörper (10) nicht mehr polarisiert. Streuung in magnetisch toten Lagen an den Grenzflächen zwischen dem Kontakt (22) und dem Festkörper (10) hat denselben Effekt. Die Stromzufuhr kann jedoch in der Vorrichtung in Abb. 9 auch entsprechend Abb. 8 durch die magnetische Schicht (12) hindurch geschehen.

[0026] Abb. 10 entspricht Abb. 9, wobei eine zusätzliche Schicht (26) zwischen den elektrischen Kontakt (22) an den Festkörper (10) und die magnetische Schicht (12) eingebracht ist, vgl. dazu auch Abb. 3. Die zusätzliche Schicht (26) ist vorzugsweise wieder ein Isolator, der den elektrischen Kontakt von der magnetischen Schicht trennt.

[0027] Abb. 11 zeigt die bevorzugte Verwirklichung des erfundungsgemäßen Detektors zum Nachweis der Spinpolarisierung von Ladungsträgersystemen. Der in der Abbildung dargestellte Aufbau des Detektors entspricht im wesentlichen der in Abb. 10 dargestellten Vorrichtung, wobei der Strom I nun aus dem Festkörper (10) in den elektrischen Kontakt (22) fließt. Jedoch lassen sich alle in Abb. 1 bis 9 dargestellten Vorrichtungen durch einfache Umkehr der Richtung des Ladungsträgertransports auch als Vorrichtungen zur Detektion der Spinpolarisation von Ladungsträgersystemen verwenden. Wegen der Spinelektivität des elektrischen Transports im Bereich des Magnetfeldgradienten können bevorzugt Ladungsträger einer Spinorientierung in den besagten Kontakt (22) gelangen, der elektrische Widerstand für den Transport der zwei möglichen Spinspezies ist unterschiedlich. Dementsprechend erlaubt eine Messung des

elektrischen Widerstandes, bevorzugt z. B. zwischen dem in Abb. 11 nicht dargestellten, strominjizierenden Kontakt an den Festkörper (10) und dem Kontakt (22) die Bestimmung der Spinpolarisation des Ladungsträgersystems.

- 5 [0028] Die bevorzugte Realisierung einer Vorrichtung, die erfundungsgemäß ein spinpolarisiertes Ladungsträgersystem in einem Festkörper erzeugt und die Bestimmung der Spinpolarisation des Ladungsträgersystems erlaubt, ist in Abb. 12 wiedergegeben. Ein solcher Spintransistor besteht – entsprechend den Ausführungen zu Abb. 11 – exemplarisch aus einem erfundungsgemäßen Spinpolarisator nach Abb. 10 und einem Spinpolarisationsdetektor nach Abb. 11, die auf demselben Festkörper (10) realisiert werden.
- 10 [0029] Die in Abb. 12 dargestellte Vorrichtung kann auch zur Realisierung magnetischer Speicher mittels der erfundungsgemäßen Erzeugung und Detektion von spinpolarisierten Ladungsträgersystemen verwendet werden, indem die Orientierung der Magnetisierung der magnetischen Schicht (12) z. B. des Spinpolarisationsdetektors gezielt eingestellt oder invertiert wird. Dazu wird beispielsweise die Magnetisierungsrichtung des spinpolarisierenden Bereichs  $M_p$  (linke Hälfte der Abb. 13) festgehalten, bevorzugt mittels einer hartmagnetischen Schicht (12), während diejenige des spinanalysierenden Bereichs  $M_a$  (rechte Hälfte der Abb. 13) zwischen zwei Orientierungen ( $M_a$  parallel bzw. antiparallel zu  $M_p$ ) hin- und hergeschaltet werden kann. Die Orientierung von  $M_a$  kann damit zur Speicherung von Information, nämlich eines Bits ("0" oder "1", "aus" oder "an", "parallel" oder "antiparallel") verwendet werden. Um ein gezieltes Umklappen von  $M_a$  ohne Beeinflussung von  $M_p$  zu erlauben, besteht die magnetische Schicht des spinanalysierenden Bereichs z. B. aus einem weichmagnetischen Material, dessen Magnetisierung insbesondere durch ein externes Magnetfeld umgeklappt werden kann. Letzteres wird bevorzugt durch zwei separate, auf die magnetische Schicht (12) des spinanalysierenden Bereichs aufgebrachte Leiterbahnen erzeugt, einer sogenannten Bit- und einer Wordleitung, die jeweils mit den Strömen  $I_{B1}$  und  $I_{Word}$  belegt werden können. Die Größe und Richtung von  $I_{B1}$  und  $I_{Word}$  werden so gewählt, daß erst die Überlagerung der Magnetfelder beider Leiterbahnen ausreicht, um  $M_a$  umzuklappen. Somit wird eine selektive Adressierung einzelner magnetischer Schichten auch in einem großen Array dieser Vorrichtungen in der Form integrierter magnetoelektronischer Schaltkreise möglich. Der elektrische Widerstand entlang der Richtung des Stromes I hängt, wie oben dargelegt, von der relativen Orientierung von  $M_a$  und  $M_p$  ab. Damit kann durch eine Bestimmung dieses Widerstandes die Orientierung von  $M_a$  und damit auch die gespeicherte Information ausgelesen werden.
- 15 [0030] Abb. 14 veranschaulicht den eben beschriebenen magnetischen Speicher nochmals, wobei nun die magnetischen Schichten von spinpolarisierendem (20) und spinanalysierendem Bereich nicht wie in Abb. 13 aus magnetischen Materialien bestehen, sondern als normal- oder supraleitende Leiterbahnen ausgelegt sind. Die Ströme  $I_{B1}$  bzw.  $I_{B2}$  erzeugen nun die erfundungsgemäß benötigten inhomogenen Magnetfelder; durch Umkehren der Stromrichtung von  $I_{B2}$  relativ zu  $I_{B1}$  und das damit verbundene Umdrehen der Richtung des inhomogenen Magnetfelds  $B$  im spinanalysierenden Bereich kann wieder der Widerstand der Vorrichtung entlang der Richtung des Stromes I verändert werden.
- 20 [0031] Bei den erfundungsgemäßen Bauelementen ist einen hohe Integrationsdichte erreichbar, da die Wirkung der Gradientenfelder im Abstand von wenigen hundert Nanometern von der magnetischen Struktur verschwindet, die das inhomogene Magnetfeld erzeugt. Auf der anderen Seite ist die zu Verlust von Spinpolarisation führende Streuung im

Ladungsträgersystems besonders in zweidimensionalen Elektronensystemen so groß, daß eine einmal erzeugte Spinpolarisation bei einem Ladungsträgertransport über weite Bereiche des Bauelementes (in einigen Halbleitern über eine Länge von mehreren Mikrometern) erhalten bleibt.

[0032] Die erfundungsgemäßen magnetoelektronischen Bauelemente lassen sich zu integrierten Schaltkreisen verbinden, z. B. zur Realisierung von magnetischen Speicherbauelementen (MRAM). Die Bauelemente lassen sich jedoch auch vorteilhaft mit konventionellen mikroelektronischen Bauelementen wie z. B. Transistoren zu integrierten Schaltkreisen kombinieren. Dies ist z. B. von Vorteil für die Adressierung der Bit- bzw. Word-Leitungen in einer Vorrichtung nach Abb. 13 oder zur Aussteuerung der Ströme  $I_{B1}$  und  $I_{B2}$  in einer Vorrichtung nach Abb. 14 oder zur Nachverstärkung des Stromes I durch den Festkörper (10).

[0033] Die erfundungsgemäßen Bauelemente lassen sich direkt als Sensoren zur Bestimmung von Magnetfeldern benutzen. So können z. B. über die Ummagnetisierung weichmagnetischer Schichten (12) äußere Magnetfelder gemessen werden. Es lassen sich aber auch Magnetfeldgradienten bestimmen, indem der Magnetfeldgradient, der sonst im spinpolarisierenden Bauelement durch die magnetische Struktur (12) erzeugt wird, ganz oder teilweise durch den äußeren, zu messenden Magnetfeldgradienten ersetzt wird.

[0034] Zur Realisierung von elektrischen Schaltkreisen, die auf Quantenlogik basieren, werden spinpolarisierende Ströme benötigt (z. B. B. E. Kane. Nature 393, 133 (1998)). Die erfundungsgemäßen Bauelemente lassen sich zur Erzeugung dieser spinpolarisierten Ströme sowie zur Analyse der Spinpolarisation benutzen, die das Ergebnis der quantenlogischen Operationen ist.

#### Patentansprüche

1. Ein Verfahren zur Spinpolarisierung von Ladungsträgersystemen in Festkörpern durch ein inhomogenes Magnetfeld, das durch eine Struktur hergestellt wird, die in die Nähe des Festkörpers oder auf die Oberfläche des Festkörpers gebracht wird, dadurch gekennzeichnet, daß das von dieser Struktur erzeugte mittlere Magnetfeld sowie der von dieser Struktur erzeugte Magnetfeldgradient im Wesentlichen parallel oder antiparallel zur Stromrichtung in dem Ladungsträgersystem sind.
2. Ein Verfahren zur Analyse der Spinpolarisierung von Ladungsträgersystemen in Festkörpern durch Messung des Einflusses eines inhomogenen Magnetfeldes auf den elektronischen Transport in dem Ladungsträgersystem, in dem das inhomogene Magnetfeld durch eine Struktur hergestellt wird, die in die Nähe des Festkörpers oder auf die Oberfläche des Festkörpers gebracht wird, dadurch gekennzeichnet, daß das von dieser Struktur erzeugte mittlere Magnetfeld sowie der von dieser Struktur erzeugte Magnetfeldgradient im Wesentlichen parallel oder antiparallel zur Stromrichtung in dem Ladungsträgersystem sind.
3. Ein Verfahren nach Ansprüchen 1 oder 2, in dem von außen ein zusätzliches homogenes Magnetfeld im Wesentlichen parallel oder antiparallel zur Stronrichtung in dem Ladungsträgersystem angelegt wird.
4. Ein Verfahren nach Ansprüchen 1 oder 2, in dem das Ladungsträgersystem aus Elektronen oder Löchern gebildet wird.
5. Ein elektronisches Bauelement auf der Basis der Ansprüche 1 oder 2, in dem die das inhomogene Magnetfeld erzeugende Struktur aus einem Ferromagneten, einem Antiferromagneten, einem semimagneti-

schen Halbleiter oder aus Heterostrukturen aus diesen Materialien gebildet wird.

6. Ein elektronisches Bauelement auf der Basis der Ansprüche 1 oder 2, in dem die das inhomogene Magnetfeld erzeugende Struktur aus einem strondurchflossenen elektrischen Leiter gebildet wird.
7. Ein Bauelement nach Anspruch 6, in dem der elektrische Leiter ein Supraleiter ist.
8. Ein elektronisches Bauelement auf der Basis der Ansprüche 1 oder 2, in dem der Festkörper durch einen Halbleiter, eine Halbleiterschichtstruktur oder eine Halbleiter-Isolator-Schichtstruktur gebildet wird.
9. Ein Bauelement nach Anspruch 8, in dem der Halbleiter oder die Halbleiterschichtstruktur aus GaAs, AlAs, InAs, ihren Legierungen oder deren Legierungen mit Übergangsmetallelementen oder ferromagnetischen Elementen, aus GaSb, AlSb, InASb, ihren Legierungen oder deren Legierungen mit Übergangsmetall-elementen oder ferromagnetischen Elementen, aus GaN, AlN, InN, ihren Legierungen oder deren Legierungen mit Übergangsmetallelementen oder ferromagnetischen Elementen, aus ZnS, ZnSe, ZnTe, ihren Legierungen oder deren Legierungen mit anderen Elementen der II. oder VI. Hauptgruppe oder II. Nebengruppe des Periodensystems oder deren Legierungen mit Übergangsmetallelementen oder ferromagnetischen Elementen, oder aus Si, Ge, C oder ihren Legierungen oder deren Legierungen mit Übergangsmetall-elementen oder ferromagnetischen Elementen gebildet wird oder die Halbleiter-Isolator-Schichtstruktur aus einem der vorgenannten Halbleiter und  $\text{SiO}_2$  oder  $\text{Si}_3\text{N}_4$  gebildet wird.
10. Ein Bauelement nach Anspruch 8, in dem die Halbleiterschichtstruktur oder die Halbleiter-Isolator-Schichtstruktur einen Quantenfilm oder einen Quantendraht enthält.
11. Ein Bauelement nach Anspruch 8, in dem sich in dem Halbleiter, in der Halbleiterschichtstruktur oder in der Halbleiter-Isolator-Schichtstruktur ein zweidimensionales oder eindimensionales Ladungsträgersystem ausbildet.
12. Ein elektronisches Bauelement auf der Basis der Ansprüche 1 oder 2, in dem durch zwei elektrische Kontakte ein elektrischer Strom durch das Ladungsträgersystem gezogen werden kann, so daß der Strom im Wesentlichen parallel oder antiparallel zu dem inhomogenen Magnetfeld fließt.
13. Ein elektronisches Bauelement auf der Basis der Ansprüche 1 oder 2, in das zwischen den Festkörper und die das inhomogene Magnetfeld erzeugende Struktur wenigstens eine weitere Schicht eingebracht wurde.
14. Ein Bauelement nach Anspruch 13, in dem wenigstens eine der zusätzlich eingebrachten Schichten zur elektrischen Isolation zwischen dem Festkörper und der das inhomogene Magnetfeld erzeugenden Struktur dient.
15. Ein Bauelement nach Anspruch 13, in dem wenigstens eine der zusätzlich eingebrachten Schichten einen elektrischen Kontakt zum Festkörper bildet.
16. Ein Bauelement nach Anspruch 15, in dem die von dem Kontakt injizierten Ladungsträger im Festkörper einen Magnetfeldgradienten durchlaufen, der seine Orientierung relativ zu der Stronrichtung der Ladungsträger nicht umkehrt.
17. Ein Bauelement nach Anspruch 15, in dem der elektrische Kontakt derart lateral eingeschränkt ist, daß die von dem Kontakt injizierten Ladungsträger im Festkörper einen maximalen Magnetfeldgradienten

durchlaufen.

18. Ein Bauelement nach Anspruch 15, in dem eine der zusätzlich eingebrachten Schichten zur elektrischen Isolation zwischen dem elektrischen Kontakt an den Festkörper und der das inhomogene Magnetfeld erzeugenden Struktur dient. 5
19. Ein Bauelement nach Ansprüchen 5, 6 oder 7, in dem die Spinpolarisation des Ladungsträgersystems durch unterschiedliche Stärke oder Orientierung des von außen angelegten homogenen Magnetfeldes oder 10 des von der Struktur erzeugten inhomogenen Magnetfeldes eingestellt oder invertiert werden kann.
20. Ein Bauelement nach Ansprüchen 5 und 19, in dem die erzeugte Spinpolarisation invertiert wird durch Ummagnetisierung eines magnetischen Materials in 15 der das inhomogene Magnetfeld erzeugenden Struktur.
21. Ein Bauelement nach Anspruch 20, in dem das zur Ummagnetisierung benötigte Magnetfeld durch wenigstens einen zusätzlichen stromdurchflossenen Leiter erzeugt wird. 20
22. Ein Bauelement nach Anspruch 21, in dem zur Ummagnetisierung zwei zusätzliche stromdurchflossene Leiter verwendet werden, um eine selektive Adressierung der umzumagnetisierenden Struktur innerhalb einer integrierten Schaltung zu erlauben. 25
23. Ein Bauelement nach Ansprüchen 6 oder 7 und Anspruch 19, in dem die erzeugte Spinpolarisation invertiert wird durch Änderung der Richtung des Stromes durch die das inhomogene Magnetfeld erzeugende Struktur. 30
24. Ein Bauelement nach Ansprüchen 5, 6 oder 7, in dem die Spinpolarisation des Ladungsträgersystems charakterisiert wird durch die Messung des Widerstandes des Ladungsträgersystems zwischen zwei Kontakten nach Anspruch 12, der zwischen diesen Kontakten 35 abfallenden Spannung bei vorgegebenem eingeprägten Strom durch das Ladungsträgersystem oder des Stromes bei vorgegebener, über den Kontakten angelegter Spannung.
25. Ein Bauelement nach Anspruch 24, in dem einer 40 der beiden Kontakte nach Anspruch 15, 16, 17 oder 18 ausgebildet ist.
26. Ein Bauelement nach Ansprüchen 24 oder 25, in dem die Spinpolarisation des Ladungsträgersystems analysiert wird durch vergleichende Messung des Widerstandes des Ladungsträgersystems zwischen den 45 zwei Kontakten, der zwischen den Kontakten abfallenden Spannung bei vorgegebenem eingeprägten Strom durch das Ladungsträgersystem oder des Stromes bei vorgegebener, über den Kontakten angelegter 50 Spannung bei unterschiedlicher Stärke oder Orientierung des von außen angelegten homogenen Magnetfeldes oder des von der Struktur erzeugten inhomogenen Magnetfeldes.
27. Ein Bauelement nach Anspruch 5 und Ansprüchen 55 24, 25 oder 26, in dem die Orientierung des inhomogenen Magnetfelds durch Ummagnetisierung eines magnetischen Materials in der das inhomogene Magnetfeld erzeugenden Struktur invertiert wird.
28. Ein Bauelement nach Anspruch 27, in dem das zur 60 Ummagnetisierung benötigte Magnetfeld durch wenigstens einen zusätzlichen stromdurchflossenen Leiter erzeugt wird.
29. Ein Bauelement nach Anspruch 28, in dem zur 65 Ummagnetisierung zwci zusätzliche stromdurchflossene Leiter verwendet werden, um eine selektive Adressierung der umzumagnetisierenden Struktur innerhalb einer integrierten Schaltung zu erlauben.

30. Ein Bauelement nach Ansprüchen 6 oder 7 und Ansprüchen 24, 25 oder 26, in dem die Orientierung des inhomogenen Magnetfelds invertiert wird durch Änderung der Richtung des Stromes durch die das inhomogene Magnetfeld erzeugende Struktur.
31. Ein elektronisches Bauelement auf der Basis der Ansprüche 1 oder 2, in dem auf einem Festkörper zwei Strukturen inhomogene Magnetfelder erzeugen, wobei eine Struktur zusammen mit dem Festkörper ein Bauelement entsprechend einem oder mehrerer Ansprüche aus den Ansprüchen 5 bis 23 bildet, das ein spinpolarisierter Ladungsträgersystem erzeugt, und eine Struktur zusammen mit dem Festkörper ein Bauelement entsprechend einem oder mehrerer Ansprüche aus den Ansprüchen 5 bis 18 und 24 bis 30 bildet, das die Spinpolarisation desselben Ladungsträgersystems charakterisiert.
32. Ein steuerbares elektronisches Bauelement nach Anspruch 31, wobei der Widerstand des Ladungsträgersystems zwischen zwei Kontakten nach Anspruch 15, 16, 17 oder 18, die zwischen diesen Kontakten abfallenden Spannung bei vorgegebenen eingeprägten Strom durch das Ladungsträgersystem oder der Stromes bei vorgegebener, über den Kontakten angelegter Spannung abhängig sind von der Stärke oder Orientierung des von außen angelegten homogenen Magnetfeldes oder der von den beiden Strukturen erzeugten inhomogenen Magnetfelder und nach den Ansprüchen 19 bis 23 bzw. 24 bis 30 gesteuert werden können.
33. Integrierte Schaltkreise, die durch Verknüpfung von Bauelementen gemäß der Ansprüche 5 bis 32 gebildet werden.
34. Die Verwendung eines Bauelementes gemäß der Ansprüche 5 bis 33 zusammen mit konventioneller Mikroelektronik in integrierten Schaltkreisen.
35. Die Verwendung eines Bauelementes gemäß der Ansprüche 5 bis 33 als Magnetfeldsensor.
36. Die Verwendung eines Bauelementes gemäß der Ansprüche 5 bis 33 zur magnetischen Datenspeicherung.
37. Die Verwendung eines Bauelementes gemäß der Ansprüche 5 bis 33 in Schaltkreisen, die auf der Basis von Quantenlogik operieren.

---

Hierzu 10 Seite(n) Zeichnungen

---

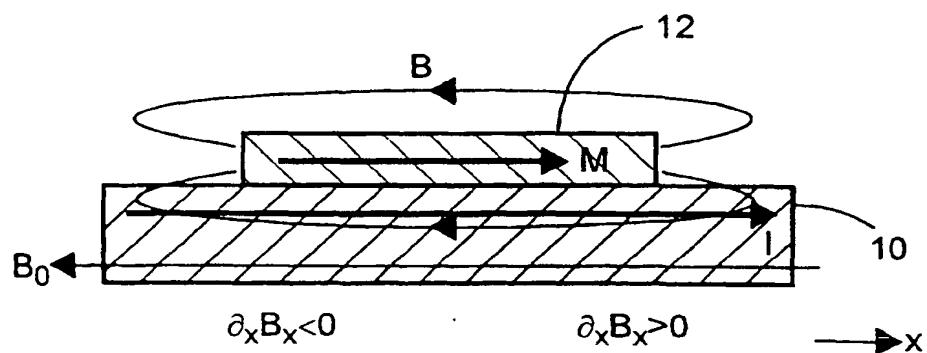


Abb. 1

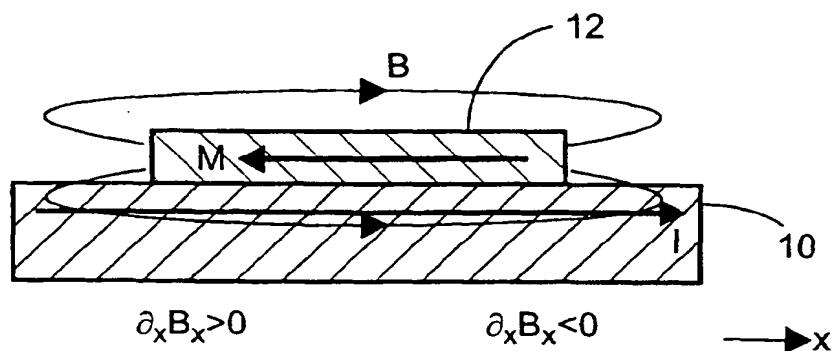


Abb. 2

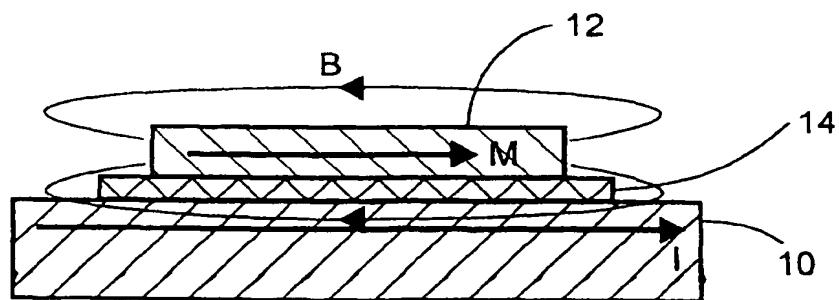


Abb. 3

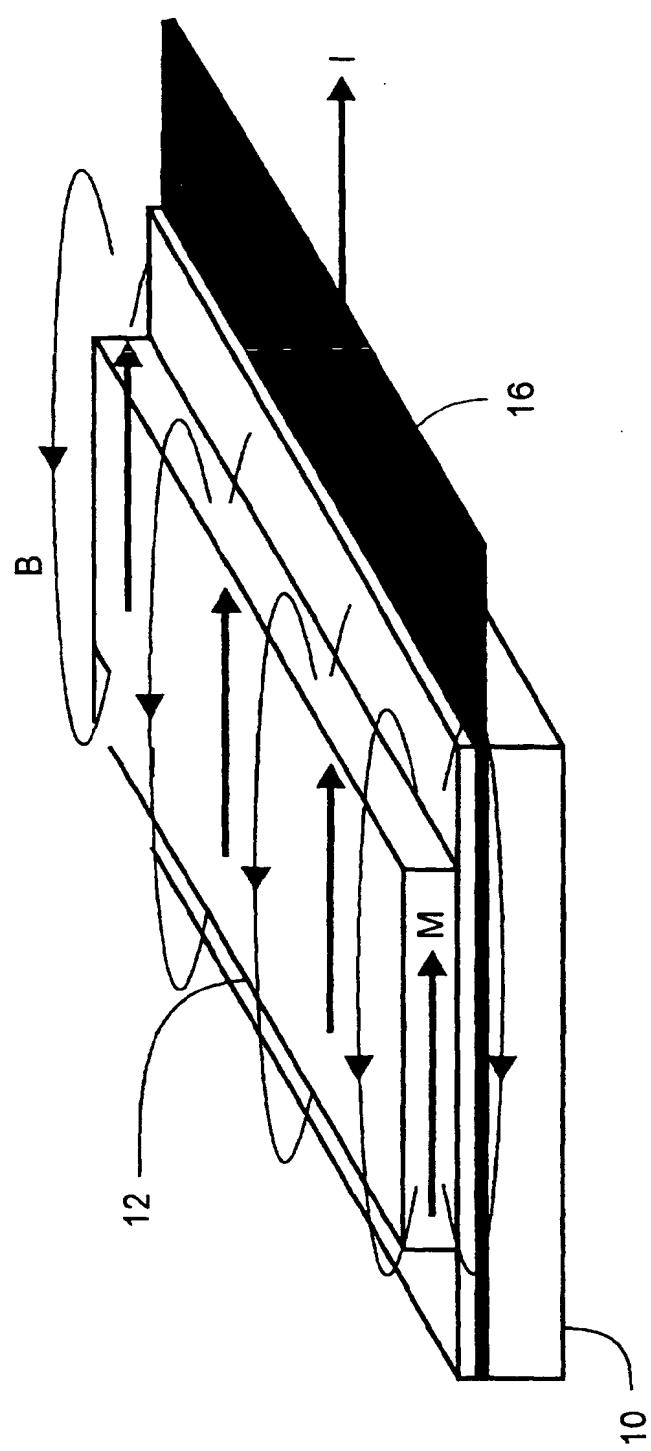


Abb. 4

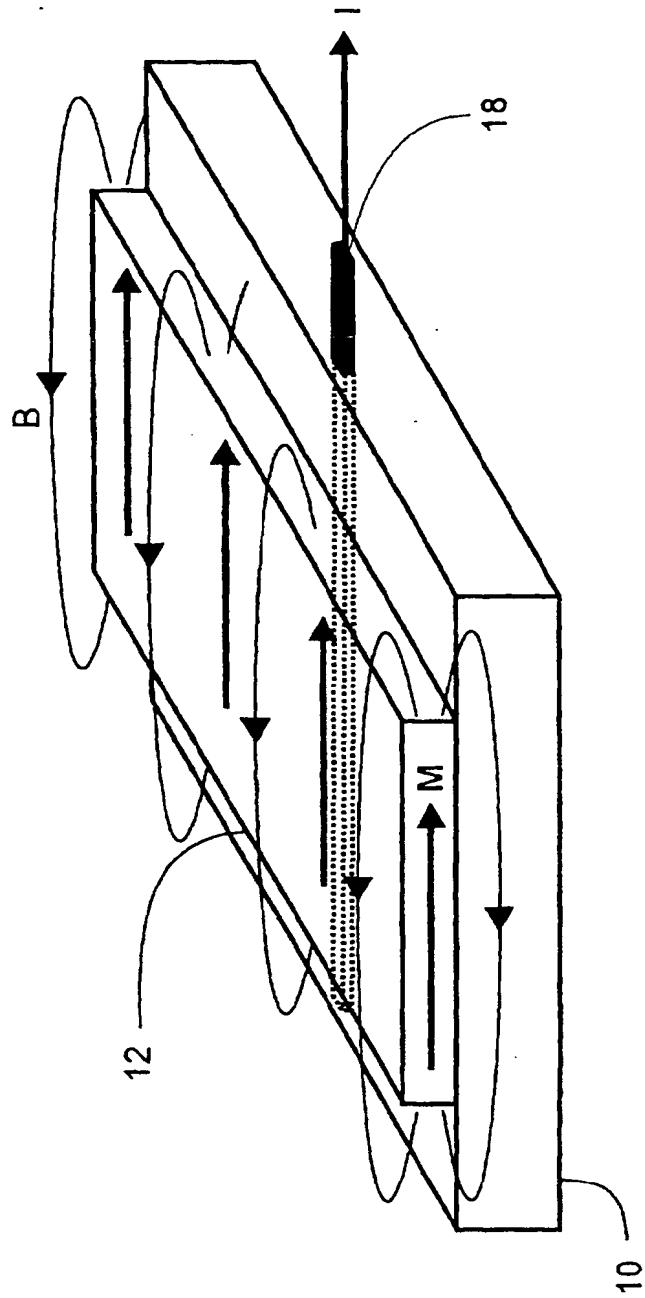


Abb. 5

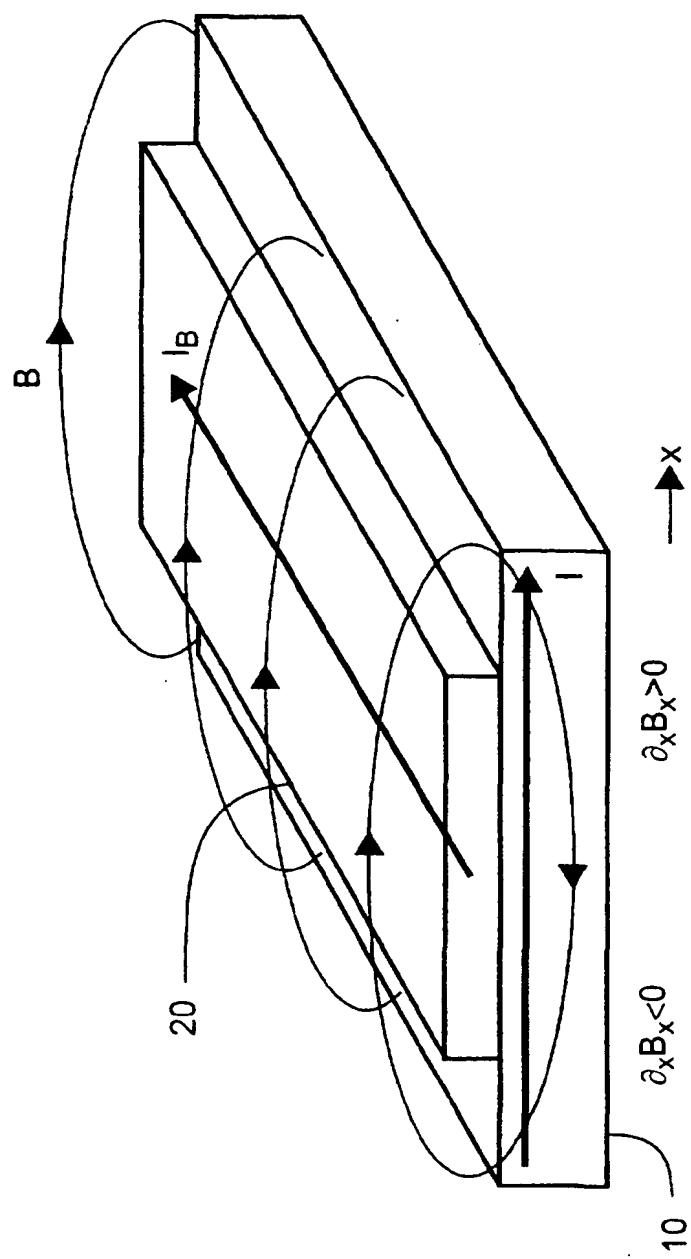


Abb. 6

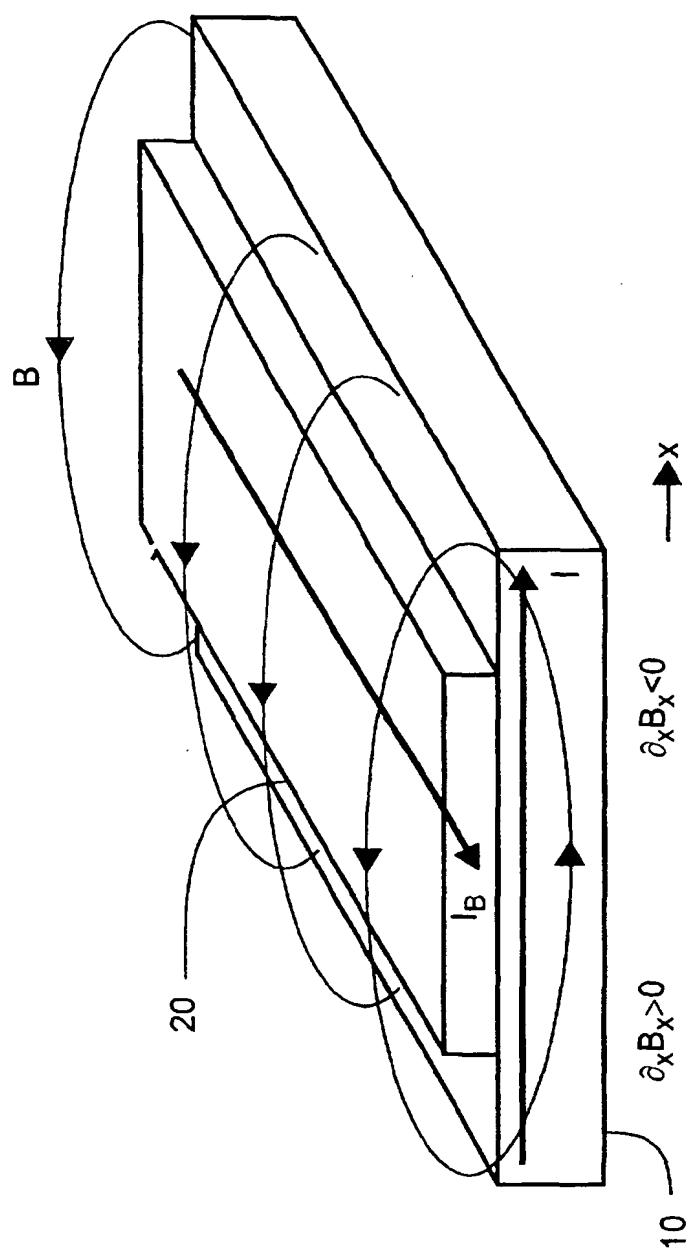


Abb. 7

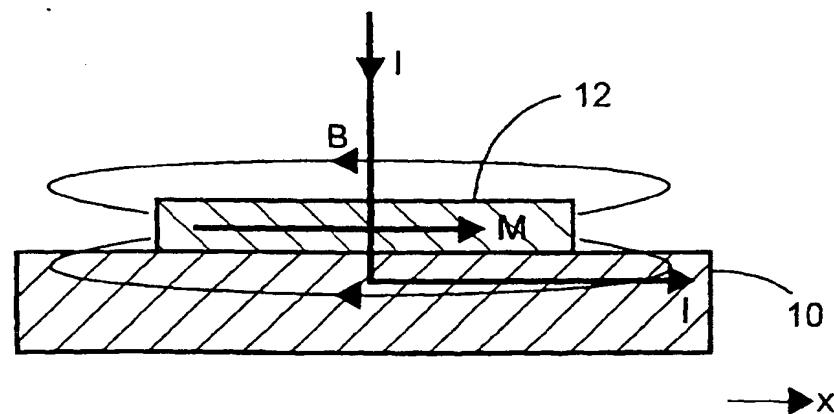


Abb. 8

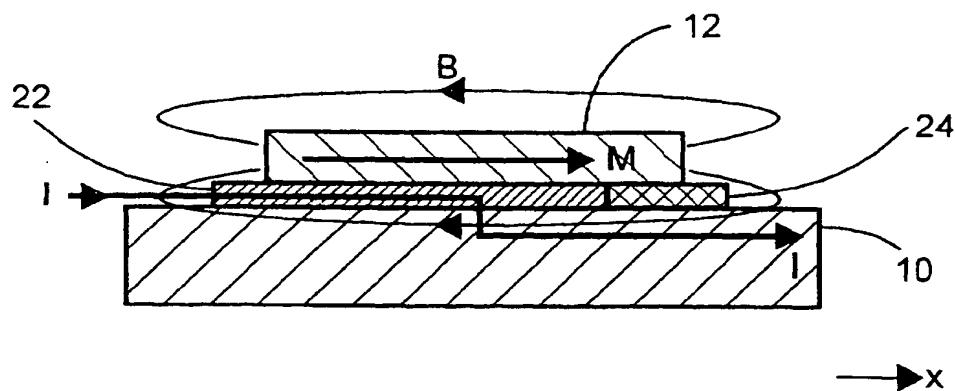


Abb. 9

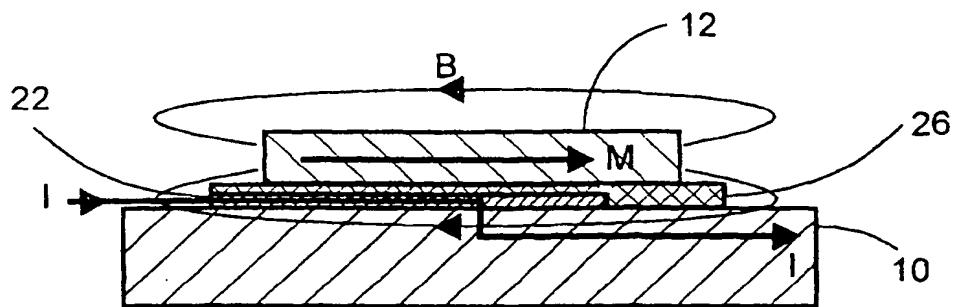


Abb. 10

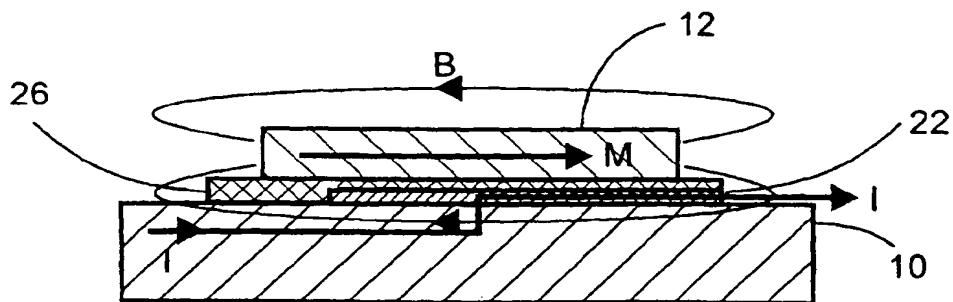


Abb. 11

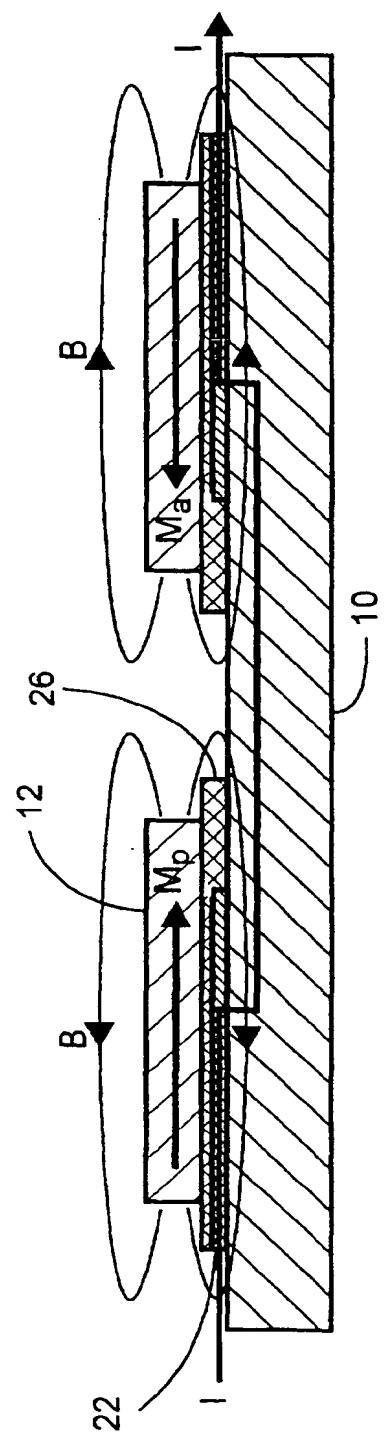


Abb. 12

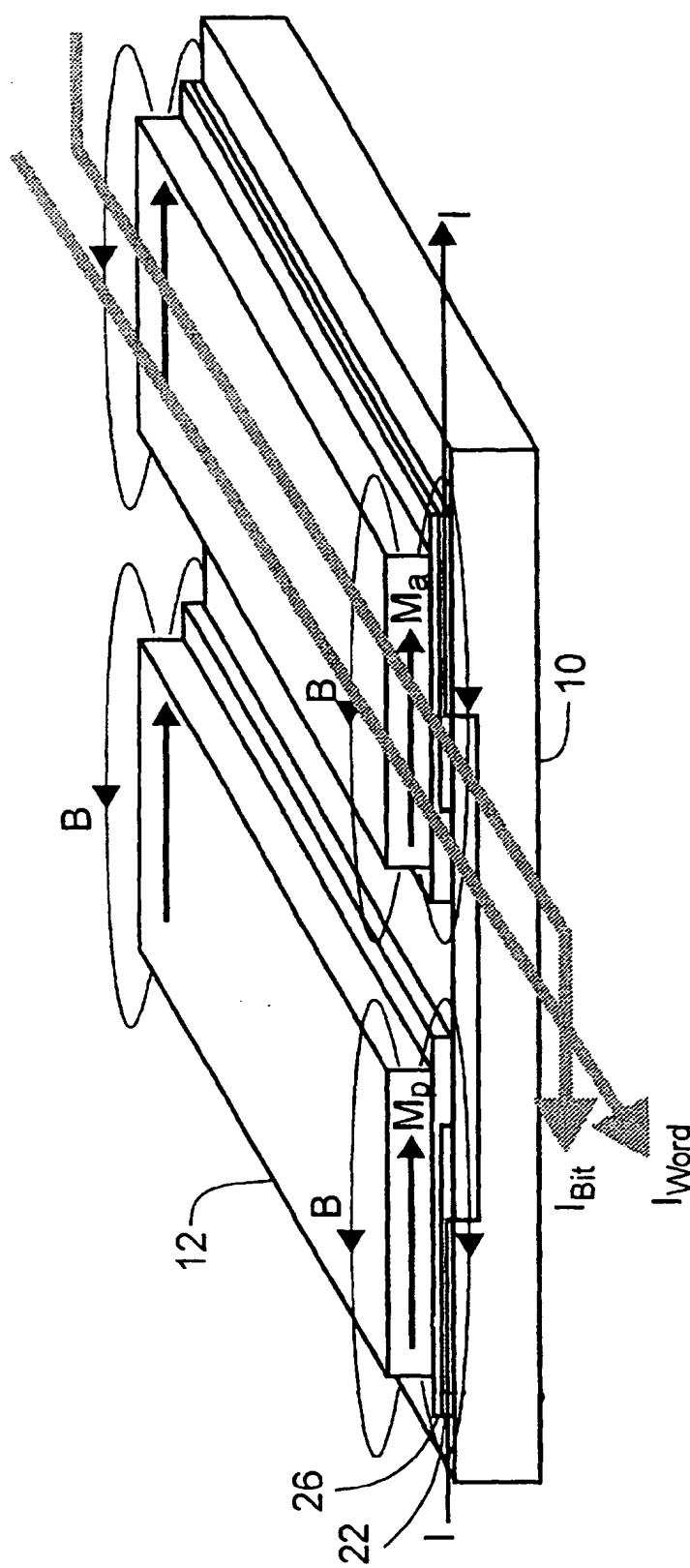


Abb. 13

BEST AVAILABLE COPY

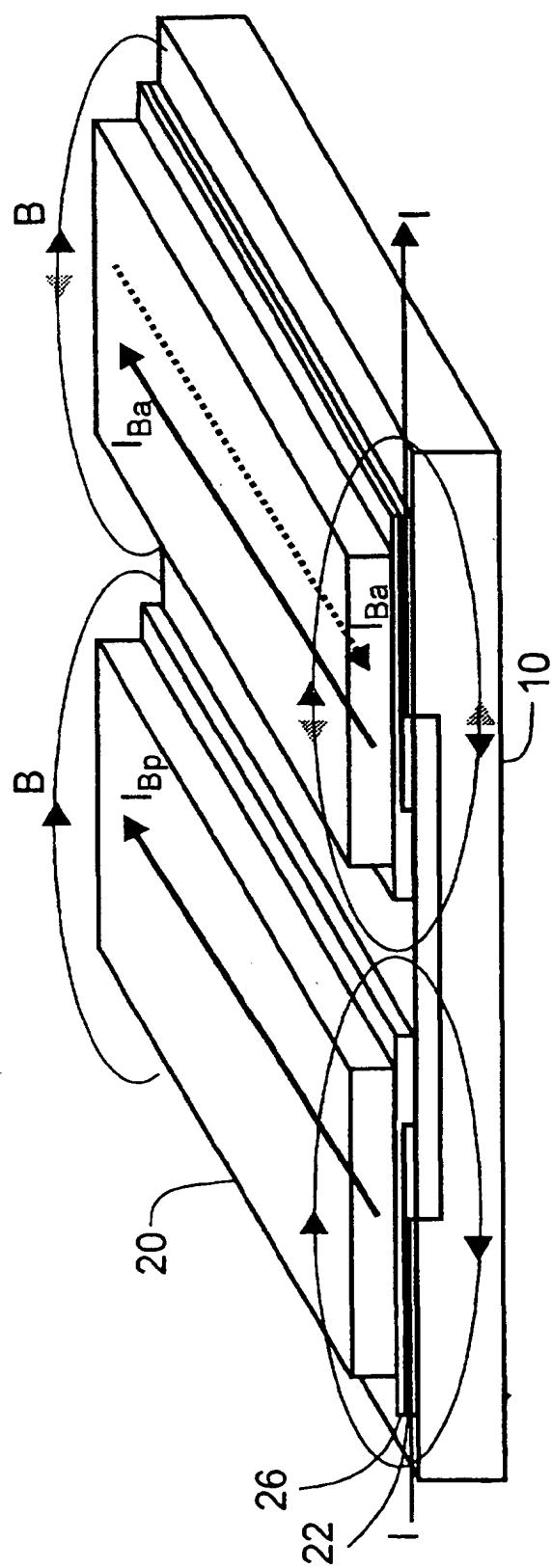


Abb. 14